

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИОНУКЛИДНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ АТОМНОГО СУДОРЕМОНТА

Балтрукова Т.Б., Арефьева Д.В., Шаяхметова А.А., Джикия Ю.В., Петушок А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины»

Федерального медико-биологического агентства

Резюме. Целью исследования являлась оценка доз облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии в процессе ремонта атомных подводных лодок и разработка мероприятий, направленных на их снижение. Исследования проведены на ведущем предприятии атомного судоремонта, расположенном в Северо-Западном федеральном округе. Методом ретроспективного анализа проведена оценка доз облучения дефектоскопистов и дозиметристов за период 2017-2020 гг. Измерены индивидуальные эффективные на все тело и эквивалентные дозы облучения хрусталика и кистей рук дефектоскопистов. Установлено, что основным вредным и (или) опасным производственным фактором при проведении радионуклидной дефектоскопии является внешнее гамма-излучение. Среднегодовые значения индивидуальной эффективной дозы облучения дефектоскопистов за время наблюдения составили $(6,60 \pm 1,62)$ мЗв/год, что примерно в шесть раз выше доз облучения дозиметристов $(1,18 \pm 0,60)$ мЗв/год, осуществляющих контроль безопасного проведения дозиметрических работ, и иного персонала группы А предприятия $(1,06 \pm 0,05)$ мЗв/год. Анализ статистических отчетных форм № 1-ДОЗ, нарядов-допусков на выполнение радиационно опасных работ, а также измеренных при проведении дефектоскопии доз облучения эффективных и эквивалентных доз облучения хрусталика и кистей рук дефектоскопистов показал неравномерное распределение дозовой нагрузки на персонал, как в течение смены, так и в течение года. На основании полученных результатов разработаны мероприятия, направленные на снижение дозовой нагрузки на персонал при проведении радионуклидной дефектоскопии на ремонтируемых атомных объектах морской техники.

Ключевые слова: дефектоскописты; условия труда; дозы облучения; ионизирующее излучение

EVALUATION OF PERSONNEL EXPOSURE DOSES DURING RADIONUCLIDE FLAW DETECTION AT A NUCLEAR SHIP REPAIR ENTERPRISE

Baltrukova T.B., Aref'eva D.V., Shayakhmetova A.A., Dzhikiya Yu.V., Petushok A.V.

Research institute of industrial and maritime medicine of Federal medical biological agency

Summary. The purpose of the study was to assess the exposure doses of personnel during radionuclide flaw detection during the repair of nuclear submarines and to develop measures aimed at reducing them. The studies were carried out at the leading nuclear ship repair enterprise located in the Northwest Federal District of Russia. The method of retrospective analysis was used to assess the exposure doses of flaw detectorists and dosimetrists for the period 2017-2020. Individual effective doses to the whole body and equivalent doses to the lens of the eyes and hands of flaw detectorists were measured. It has been established that the main harmful and (or) dangerous production factor during radionuclide flaw detection is external gamma radiation. The average annual values of the individual effective dose of flaw detectorists during the observation period amounted to (6.60 ± 1.62) mSv / year, which is approximately six times higher than the radiation doses of dosimetrists (1.18 ± 0.60) mSv / year, who monitor safe conduct dosimetric works, and other personnel of group A of the enterprise (1.06 ± 0.05) mSv/year. An analysis of statistical reporting forms No. 1-DOZ, work permits for carrying out radiation-hazardous work, as well as the effective and equivalent doses of radiation of the lens of the eyes and hands of flaw detectors measured during flaw detection showed an uneven distribution of the dose load on personnel both during the shift and throughout the year. Based on the results obtained, measures were developed aimed at reducing the dose load of personnel during radionuclide flaw detection on repaired nuclear maritime facilities.

Key words: flaw detectorists; working conditions; radiation doses; ionizing radiation

Введение. Развитие инфраструктуры и интенсификация промышленного использования Северного морского пути предусматривают увеличение объемов строительства новых и ремонта существующих атомных объектов морской техники. При этом важно обеспечить надежность и безопасность судов и судового оборудования при их эксплуатации в условиях длительного автономного плавания. Для контроля качества производимых работ широко используются методы неразрушающего контроля, основанные на применении источников ионизирующего излучения. Действующая в настоящее время система обеспечения безопасных условий труда на предприятиях атомного судоремонта позволяет обеспечивать уровни облучения персонала ниже основных пределов доз [1, 2]. Однако уровни облучения отдельных профессиональных групп и отдельных их

представителей могут значительно отличаться друг от друга, что может быть связано как с технологическими особенностями радиационно опасных работ и условиями их выполнения, так и с организацией трудового процесса.

На предприятиях атомного судостроения и судоремонта наиболее высокие индивидуальные эффективные дозы облучения регистрируются у дефектоскопистов, выполняющих гамма- и рентгенографирование [3, 4]. Эти работы проводятся с целью контроля состояния сварочных швов на трубопроводах, резервуарах, разном оборудовании и металлоконструкциях, определения целостности конструкций и выявления скрытых дефектов для предотвращения аварийных ситуаций.

При ремонте атомных подводных лодок широкое распространение получило использование радионуклидной дефектоскопии, применение которой создает угрозу внешнего и внутреннего облучения персонала [5]. В связи с этим для обеспечения радиационной безопасности персонала при выполнении работ по радионуклидной дефектоскопии необходимо совершенствовать систему радиационной защиты, основываясь на основных принципах обеспечения радиационной безопасности – нормирования, обоснования и оптимизации [6].

Цель исследования: оценка дозовых нагрузок на персонал предприятий атомного судоремонта при проведении радионуклидной дефектоскопии и разработка мероприятий, направленных на их снижение.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *задачи*:

- изучить особенности формирования радиационной обстановки на рабочих местах персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии;
- проанализировать индивидуальные эффективные и эквивалентные дозы облучения хрусталика и кистей рук дефектоскопистов;
- разработать предложения по совершенствованию мер обеспечения радиационной безопасности персонала группы А при проведении радионуклидной дефектоскопии.

Материалы и методы. Объектом исследования являлся персонал, выполняющий работы по радионуклидной дефектоскопии на ремонтируемых атомных подводных лодках. Методом ретроспективного анализа проведена оценка доз облучения дефектоскопистов и дозиметристов по данным статистических отчетных форм № 1-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации организациями техногенных источников ионизирующих излучений» за период 2017-2020 гг. Проанализированы данные 317 нарядов-допусков на проведение радиационно опасных работ по радионуклидной дефектоскопии за 2020 г. Проведены измерения индивидуальных

эффективных (на все тело) и эквивалентных доз облучения хрусталика и кистей рук у дефектоскопистов.

Для оценки индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения на все тело, хрусталик и кожу персоналу были выданы индивидуальные термолюминесцентные дозиметры на время выполнения радиационно опасных работ. Термолюминесцентные дозиметры размещались на нагрудном кармане (ДТЛ-02), на каске или защитных очках на уровне глаз (МКД (тип А)), на защитных перчатках (МКД (тип Б)). Погрешность за счет энергетической чувствительности детекторов в полях гамма-излучения не превышала 30 %. Всего было выполнено 10 измерений. Основная погрешность результатов измерений $H_p(10)$ составила 20 % ($P=0,95$), а дополнительная, связанная с изменениями внешних факторов (температуры, влажности воздуха и др.), относительно нормальных условий не превышала 20 %.

Статистический анализ первичных результатов проводили с помощью MS Excel 2010 и Statistica 8. За критический уровень достоверности нулевой гипотезы принимали $p \leq 0,05$ (95%-й уровень значимости).

Результаты исследования. Радионуклидная дефектоскопия является методом неразрушающего контроля внутренней макроструктуры контролируемых объектов с помощью закрытых источников ионизирующего излучения [7]. Гамма-дефектоскоп содержит радиационную защиту с источником излучения, коллиматор и привод для перемещения источника излучения из состояния «хранение» в состояние «работа» и обратно [8]. При проведении радиографического контроля металла и сварных соединений на ремонтируемом атомном объекте морской техники в труднодоступных и затесненных условиях применяются гамма дефектоскопы с использованием источников ионизирующих излучений на основе радионуклида иридий-192 с максимальной активностью до 4,44 ТБк.

В штатных условиях основным видом радиационного воздействия, которому подвергается персонал, выполняющий радионуклидную дефектоскопию, является внешнее гамма облучение всего тела или отдельных его участков. При проведении работ загрязнения рабочих поверхностей альфа- и бета-частицами не зарегистрировано, значения объемной активности воздуха рабочих помещений не превышали минимально измеряемой активности для использованных средств измерений.

По результатам анализа нарядов-допусков на проведение радионуклидной дефектоскопии (включающей доставку радионуклидного дефектоскопа и непосредственно работы по радионуклидной дефектоскопии) установлено, что средние значения индивидуальной эффективной дозы облучения персонала за одну рабочую смену составляют $(0,05 \pm 0,06)$ мЗв среди дефектоскопистов и $(0,007 \pm 0,003)$ мЗв у дозиметристов. При

транспортировке оборудования и выполнении работ по радионуклидной дефектоскопии средние значения мощности амбиентного эквивалента дозы существенно различались и составляли $(10,16 \pm 4,63)$ мкЗв/ч и $(466,70 \pm 326,68)$ мкЗв/ч соответственно.

При анализе статистических отчетных форм № 1-ДОЗ было установлено, что среднегодовые эффективные дозы облучения дефектоскопистов более чем в шесть раз превышают значения доз облучения дозиметристов и иного персонала группы А (таблица 1). При этом дозы облучения дозиметристов не имели статистически значимых различий с дозами облучения иного персонала группы А.

Таблица 1.

Среднегодовые эффективные дозы облучения дефектоскопистов, дозиметристов (при проведении радионуклидной дефектоскопии) и иного персонала предприятия

Год	Среднегодовые эффективные дозы облучения, мЗв		
	дефектоскописты (группа 1)	дозиметристы (группа 2)	иной персонал группы А (группа 3)
2017	$6,10 \pm 1,44^{*,**}$	$1,12 \pm 0,17$	$1,07 \pm 0,05$
2018	$6,06 \pm 1,55^{*,**}$	$1,58 \pm 0,23$	$1,26 \pm 0,05$
2019	$7,62 \pm 1,91^{*,**}$	$1,16 \pm 0,12$	$1,08 \pm 0,06$
2020	$6,62 \pm 1,59^{*,**}$	$0,88 \pm 0,08$	$0,84 \pm 0,04$
Уровни статистической значимости различий: * $p < 0,001$ - между группами 1 и 2; ** $p < 0,001$ – между группами 1 и 3			

Можно полагать, что выявленные статистически значимые различия между среднегодовыми эффективными дозами облучения дефектоскопистов и дозиметристов обусловлены тем, что дозиметристы в ходе выполнения работ по радионуклидной дефектоскопии проводят только контроль радиационной обстановки на рабочих местах на определенном расстоянии от места проведения работ, дефектоскописты же выполняют работы по дефектоскопии в непосредственной близости от источника ионизирующего излучения.

Результаты расчета накопленных индивидуальных эффективных доз облучения дефектоскопистов и дозиметристов за четырехлетний период (учитывали только персонал, отработавший все четыре года по данной специальности) представлены на рисунках 1 и 2.



Рисунок 1 – Накопленная индивидуальная эффективная доза облучения дефектоскопистов за 2017-2020 гг.

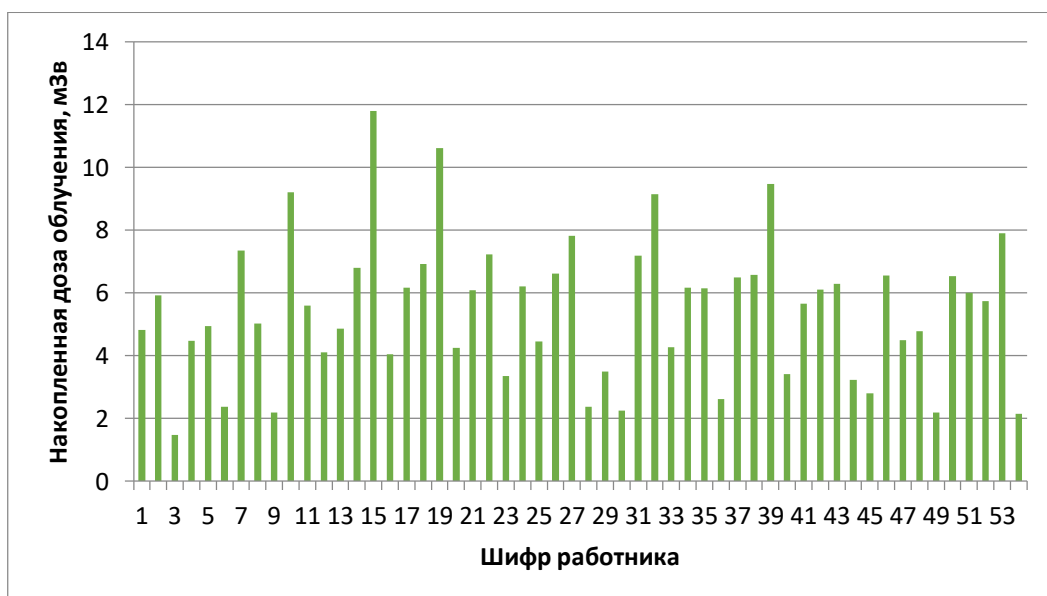


Рисунок 2 – Накопленная индивидуальная эффективная доза облучения дозиметристов за 2017-2020 гг.

Как видно из рисунков 1 и 2, накопленные за четыре года индивидуальные эффективные дозы облучения дефектоскопистов и дозиметристов имеют большой разброс и характеризуют неравномерность их облучения. Минимальная накопленная индивидуальная эффективная доза облучения дефектоскопистов составляла 2,67 мЗв, максимальная – 43,65 мЗв при среднем значении $(27,76 \pm 14,60)$ мЗв. Минимальная накопленная индивидуальная эффективная доза облучения дозиметристов составляла 1,47 мЗв, максимальная – 11,80 мЗв при среднем значении $(5,46 \pm 2,25)$ мЗв.

При измерении индивидуальных эффективных доз и эквивалентных доз на хрусталик и кожу кистей рук у дефектоскопистов за один календарный месяц было установлено, что индивидуальные эффективные дозы облучения дефектоскопистов различались в зависимости от сложности и продолжительности выполнения дефектоскопических исследований в течение смены и количества выполняемых радиационно опасных работ в месяц. Так, у за одну смену индивидуальные эффективные дозы варьировали от 0,02 мЗв до 0,09 мЗв, эквивалентные дозы на хрусталик и кожу кистей рук - от 0,26 мЗв до 0,37 мЗв и от 0,78 мЗв до 2,20 мЗв, соответственно. Значения доз облучения, полученных дефектоскопистами за один месяц, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Индивидуальные эффективные и эквивалентные дозы облучения на хрусталик и кожу кистей рук дефектоскопистов за один месяц

Шифр объекта исследования	Время ношения дозиметра	Индивидуальные дозы облучения ¹ ,		
		эффективные	эквивалентные	
			на хрусталик	на кисти рук
7	1 месяц	0,98	1,21	5,70
8	1 месяц	0,35	0,43	1,01
9	1 месяц	0,97	1,90	4,79
10	1 месяц	0,22	0,19	0,50
11	1 месяц	1,17	1,14	5,73
12	1 месяц	0,68	1,00	2,67
13	1 месяц	0,50	0,71	3,04
14	1 месяц	1,02	1,32	2,02
15	1 месяц	0,81	0,72	1,26
16	1 месяц	1,21	1,20	5,26

¹ значения указаны с учетом вычета фона

Как следует из данных, приведенных в таблице 2, эквивалентные дозы внешнего облучения хрусталика и кистей рук за месяц превышают значения эффективных доз облучения в среднем в 1,5 и 4,3 раза, соответственно.

Обсуждение. Выполненные исследования показали, что при проведении радиационно опасных работ по радионуклидной дефектоскопии персоналом судоремонтного предприятия относительно большему облучению (по сравнению с дозиметристами и иным персоналом группы А) подвергаются дефектоскописты, однако в среднем доза облучения не превышает установленных основных пределов доз.

Тем не менее, для оптимизации радиационной защиты и сокращения дозовых нагрузок на персонал при проведении радионуклидной дефектоскопии необходимо установить контрольные уровни доз облучения персонала. Однако, учитывая различную сложность проводимых дефектоскопических работ и разное время, затрачиваемое на их проведение, контрольные уровни могут быть установлены как за одну рабочую операцию (смену), так и за один месяц работ и рассчитаны как верхний предел доверительного интервала средней величины индивидуальных эффективных доз облучения. В качестве исходных данных для расчета предлагается использовать данные о полученных эффективных дозах облучения персонала за период выполнения радиационно опасной работы на предприятии. Значение контрольного уровня облучения должно быть установлено ниже производных значений от основных пределов доз облучения.

Организационными мерами целесообразно добиться равномерного распределения радиационно опасных работ таким образом, чтобы индивидуальные дозовые нагрузки были примерно на одном уровне среди лиц из персонала одной специальности. При обнаружении факта превышения контрольного уровня необходимо установить, были ли проводимые работы типичными или представляли повышенную сложность, была ли использована оптимальная защита, какие мероприятия необходимо провести в дальнейшем для снижения дозы облучения до значений контрольных уровней.

В настоящее время Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) рекомендовано пересмотреть величину основного предела дозы на хрусталик и снизить ее до значения «20 мЗв в год, усредненная за пять последовательных лет (100 мЗв за 5 лет) и 50 мЗв за любой отдельный год». Учитывая, что основные пределы доз в Российской Федерации [9] гармонизированы с другими международными нормами, можно ожидать в ближайшее время пересмотра нормируемой величины эквивалентной дозы на хрусталик до величины, рекомендованной МКРЗ. Это потребует разработки методик проведения индивидуального дозиметрического контроля эквивалентной дозы на хрусталик для дефектоскопистов, так как контроль эффективной дозы облучения не обеспечит адекватный контроль эквивалентной дозы облучения хрусталика [10, 11]. Для этого необходимо проведение дальнейших исследований и разработка критериев введения дозиметрического контроля хрусталика у работников с применением индивидуальных дозиметров.

Выводы. Дозовые нагрузки от внешнего гамма-излучения у персонала, выполняющего работы по радионуклидной дефектоскопии при ремонте атомных подводных лодок, не превышают основные дозовые пределы, однако их распределение среди отдельных лиц из персонала крайне неравномерное.

Индивидуальные эффективные дозы облучения дефектоскопистов существенно различаются в зависимости от сложности и продолжительности выполнения дефектоскопических исследований в течение смены и количества выполняемых радиационно опасных работ в месяц. Среднегодовые эффективные дозы облучения дефектоскопистов более чем в шесть раз превышают значения доз облучения дозиметристов и иного персонала группы А. Эквивалентные дозы внешнего облучения хрусталика и кистей рук у дефектоскопистов за один месяц превышают значения эффективных доз облучения в среднем в 1,5 и 4,3 раза, соответственно.

Для совершенствования мер обеспечения радиационной безопасности и снижения дозовых нагрузок на персонал предприятий атомного судоремонта в соответствии с принципом оптимизации рекомендуется:

- 1) установление контрольных уровней доз облучения персонала (дефектоскопистов) при проведении радионуклидной дефектоскопии за одну рабочую операцию (смену) и за один месяц работ;
- 2) обеспечение равномерного распределения дозовых нагрузок среди дефектоскопистов;
- 3) проведение исследований с целью разработки критериев введения дозиметрического контроля облучения хрусталика у работников с применением индивидуальных дозиметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.К., Корело А.М., Чекин А.П., и др. Риск-ориентированный подход к оптимизации радиологической защиты персонала группы А Госкорпорации «Росатом»: формирование критических групп. *Радиация и риск*. 2017; 26(3): 19-27.
2. Заключение Российской научной комиссии по радиологической защите по информационному сообщению С.Ю. Чекина об итогах экспертного совещания МАГАТЭ - Госкорпорация «Росатом» 14-16 ноября 2016 г. по проекту технического документа «Оценка индивидуальных рисков для здоровья сотрудников Госкорпорации «Росатом» в связи с внешним облучением». *Радиация и риск*. 2017; 26(1): 6-7.
3. Шаяхметова А.А., Арефьева Д.В. Оптимизация радиационной защиты дефектоскопистов по рентгено- гаммаграфированию при ремонте атомных объектов морской техники. В кн.: «Сборник тезисов всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Радиационная гигиена и непрерывное профессиональное образование: новые вызовы и пути развития», посвященной 65-летию кафедры

радиационной гигиены и радиационной безопасности имени академика Ф.Г. Кроткова». М.; 2022: 101-105.

4. Арефьева Д.В., Джикия Ю.В., Петушок А.В. Дозовые нагрузки на дефектоскопистов гаммаграфирования на предприятии по ремонту атомных подводных лодок. В кн.: *«Сборник материалов школы-конференции молодых учёных и специалистов. Ильинские чтения 2022»*. М.; 2022: 25-27.

5. Строкина, А. С., Андреев Н.Г., Андреев В.В. Оптимизация конструкции транспортного контейнера при проведении гамма-дефектоскопии оборудования с учетом дозовых нагрузок на персонал. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022; 1: 56-59.

6. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу. Утверждены указом президента 13 октября 2018 г. Available at: <https://base.garant.ru/72075716/>

7. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при радионуклидной дефектоскопии. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 24 декабря 2014 г. Available at: <https://base.garant.ru/70879390/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/>

8. Измайлова, Д.З., Костерина А.И., Шадрин Е.П. Обеспечение безопасности работников при проведении неразрушающего контроля на промышленном предприятии. *Международный студенческий научный вестник*. 2018; 1: 63.

9. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 7 июля 2009 г. Available at: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/>

10. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP*; 2007: 37.

11. Романович И.К., Водоватов А.В., Библин А.М., Кормановская Т.А. К проблеме совершенствования законодательного и нормативного обеспечения радиационной безопасности населения. *Радиационная гигиена*. 2022; 15(1): 88-95.